



TITLE:

Studies on transport phenomena of cohesive granular particles(Abstract_要旨)

AUTHOR(S):

Takada, Satoshi

CITATION:

Takada, Satoshi. Studies on transport phenomena of cohesive granular particles. 京都大学, 2016, 博士(理学)

ISSUE DATE:

2016-03-23

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.k19480>

RIGHT:

学位規則第9条第2項により要約公開; 許諾条件により本文は2016-08-01に公開(2017-01-01から変更)

(続紙 1)

京都大学	博 士 (理 学)	氏名	高田智史
論文題目	Studies on transport phenomena of cohesive granular particles 引力を持つ粉体系の輸送現象についての理論的研究		
(論文内容の要旨)			
<p>砂の様に目に見える大きさがある粒子集団は粉体と呼ばれ、通常の液体、気体、固体と異なった独特な振る舞いをする。粉体は、従来、土木工学、化学工学、機械工学、地球科学等の分野で研究されてきたが、その特異さ故に物理学の分野でも注目を集めるようになり、四半世紀にわたって研究されてきた。その結果、特に粒子間斥力と非弾性衝突の際のエネルギーロスのみで特徴付けられる理想粉体が比較的薄いガス状に分散している場合には気体分子運動論での記述が可能であることが分かり、かなり正確に流動状態の特徴を捉える事が出来るようになってきた。しかしながら、例えば水が粒子表面に付着している場合や粉体粒子をより小さくしたファインパウダーと呼ばれる粒子系を扱う場合には、粒子間引力が無視できない。言うまでもなく、このような引力効果は劇的に粉体の流動（レオロジー）に変化を与え、応用的にも極めて重要である。しかし、引力のある粘着粉体の理論的研究は、その複雑さ故に余り進んでいない。</p> <p>その背景を踏まえ、本論文ではファインパウダーの輸送現象の理論的な研究を進め、少なくともガス状の粘着粉体ガスのレオロジーをある程度明らかにした。本論文では、気体分子運動論による非弾性ボルツマン方程式の理論的解析の他、現象論、ソフトコア粒子に対する分子動力学法(MD)、ハードコア粒子に対するイベントで決まるMD(EDMD), 更に非弾性ボルツマン方程式の確率的数値的解法として知られる動的モンテカルロシミュレーション(DSMC)の多様かつ多彩な道具を駆使して解析を進めている。</p> <p>本論文では、既に述べた背景を簡潔かつ十分に述べた導入部の1章に続き、2章では斥力系の非弾性ボルツマン方程式の解析手法を初学者に分かるように、かなり詳しく説明し、3章では粉体粒子への引力の影響を独立したレビューとして読める程度に説明している。4章は、申請者が第2著者となって出版された動的ファンデルワールスモデルを用いて粘着粉体の剪断流の特徴付けに成功した参考論文(Soft Matter 11, 6371 (2015))をまとめ直している。因みに当該論文はSoft Matter誌の裏表紙になった注目論文の一つであった。5章では本論文で用いた3種類の粒子シミュレーション法（ソフトコアMD, EDMD, DSMC）を詳しく解説し、当該分野の新規参入者への便宜を図っている。</p> <p>本論文の主要部分は、公表論文として発表されている続く6章と7章である。6章では粘着粉体系に境界から剪断をかけ、それに応じてどのようなパターンや分散している粒子の速度分布がどのように決まるかをLennard-Jones型のポテンシャルを持ち、斥力部分のみに散逸がある粒子径のソフトコアMDに基づき解析し、現象論によって説明を試みている。ここでの大きな発見は無次元化された剪断率、反発係数に対応する散逸の強さに応じてドロプレット、シリンダー、プレート、逆プレート、逆シリンダー、逆ドロプレットの多様なパターンが生じる事、またパラメータによっては一様分散相が安定だったり、分散粒子状態と各種パターンが共存したり、また散逸が大きいと初期条件に応じて様々なランダムパターンが現れる事を発見した点である。またプレートと分散粒子が共存する状態での遷移層に属する粒子速度分布が現象論的考察によって説明が可能になった点も特筆に値する。</p> <p>7章では、稀薄に分散した井戸型引力ポテンシャルとハードコア斥力芯を持つ粘着性粉体ガスの運動論を主として非弾性ボルツマン方程式の系統的解析に基づいた研究成果を報告している。そこではまずこの粘着粉体の衝突力学の詳細を論じて、特に井戸型ポテンシャルに入った粒子がどのように屈折して斥力芯にどのように衝突するかを明らかにしている。続いて一様状態でのボルツマン方程式の解析解をSonine多項式の展開に基づき求めて、その結果がボルツマン方程式の</p>			

(続紙 2)

確率的数値解であるDSMCの結果とほぼ一致している事を示した。その結果、初期に分散している粒子が持つ粉体温度（運動エネルギー）が引力の影響で急速に減少することも明らかになった。またChapman-Enskog法に基づき不均一系のボルツマン方程式の近似解を求め、その結果、粘性率や熱伝導率を理論的に導く事にも成功している。勿論、これらの解はDSMCと良好な一致を示している。更に注目すべきは低温側ではDSMCのデータが取れないだけでなく摂動的に求めた展開項の寄与が非常に大きくなっている点である。これはボルツマン方程式では無視されていた凝集の効果が重要になることを間接的に示唆している。

8章では本論文をまとめた他、付録で詳細に6,7章の結果を補足している。特にEDMDの結果とその難しさはAppendix Lで説明されており、その解決が今後の課題であろう。

(論文審査の結果の要旨)

本論文は申請者のこれまでの彼の研究の集大成に留まらず、詳細なレビューや教科書的な導入を含めて英文で123頁に及ぶ大著となっている。更にオリジナルな貢献をまとめた6, 7章では申請者の注意深い解析によって粘着粉体ガスのレオロジーの現代的課題を丁寧に解析した点で、現時点での当該分野のベストな文献であると判断される。6章では、ソフトコア系でのMDによる多彩なパターン形成の発見よりも一自由度にマップした現象論的ランジュバンモデルによる速度分布の再現の成功も評価される。また7章では今迄、誰も為し得なかった膨大な解析計算を遂行して、更にDSMCとの良好な一致を見た事は博士レベルを超えて十分に学術的な価値があると認める。

同時に特に7章の解析については、引力効果によって促進される凝集の効果が無視できず、EDMDとの乖離が本質的な影響を及ぼし、非弾性ボルツマン方程式及びその確率的数値解法であるDSMC自体の限界も図らずもあぶり出した格好になっている点は注目に値する。更に、非弾性効果が無視できる場合でも引力の影響によって、粒子シミュレーションの等分配則を充たす初期条件の設定が容易ではなく、また温度の測定も容易ではない点をあぶり出した点も興味深い。その点がAppendix Lで説明したEDMDによる拡散係数の測定の曖昧さに直結している。また、粘着粉体ガスの物理的に興味のある設定は、7章で論じた自由冷却過程ではなく、剪断を加えた際の応答や定常状態であろう。その解析も今後の課題として挙げられる。更に7章での理論が稀薄極限でのみ有効である非弾性ボルツマン方程式の解析に終始したのは現時点での申請者の研究の限界であり、今後、理論を有限密度系に拡張する事が期待される。しかし、6、7章のユニークな結果や1－5章での丁寧な導入とレビュー、付録での詳細な計算を含む本学位論文は標準的なレベルを超える優れたものであり、同時にオリジナリティに溢れるものとして高く評価される。

よって、本論文は博士（理学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成28年1月20日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。

要旨公表可能日： 年 月 日以降